

高密度臨時地震観測に基づく 南海トラフ巨大地震における高知県南国市 津波来襲予想地域での強震動の予測

秦 吉弥¹・中嶋 唯貴²・湊 文博³・鋤田 泰子⁴・小山 真紀⁵・常田 賢一⁶

¹ 正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

² 正会員 北海道大学 大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8)

E-mail: nakashima@eng.hokudai.ac.jp

³ 学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: fminato@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁴ 正会員 神戸大学 大学院工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1)

E-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp

⁵ 正会員 岐阜大学 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: maki_k@gifu-u.ac.jp

⁶ フェロー会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

本稿では、南海トラフ巨大地震において津波来襲が予想されている高知県南国市の沿岸域を対象に、強震動シミュレーションを実施した結果について報告する。その際、対象地域において高密度地震観測(計51地点)を臨時実施し、得られた観測記録を用いてサイト増幅特性を評価した。その結果、予測地震動に基づく対象地域における気象庁計測震度は6.0~6.7程度および避難困難時間は160~220s程度であることがそれぞれ明らかとなり、地震動と津波の複合災害を考慮した人的被害の推定に役立つことが期待できる。

Key Words : temporary earthquake observation, site amplification factor, strong motion estimation, instantaneous instrumental seismic intensity, tsunami evacuation

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震($M_w9.0$)の発生を受け、南海トラフにおいても、 $M_w9.0$ 程度の巨大地震(南海トラフ巨大地震と呼ぶ)を想定した強震動の予測が内閣府¹⁾により行われている。高知県南国市は、図-1に示すように、想定震源域の近傍に位置しており、南海トラフ巨大地震時に非常に大きな強震動の作用が予想される。南国市は、南海トラフ巨大地震発生時において近隣の高知市の後方支援拠点に指定されており、南国市を対象とした南海トラフ巨大地震による強震動の評価は、非常に重要²⁾であると言える。さらに、南国市の沿岸部では、南海トラフ巨大地震の発生後、巨大津波の早期来襲が予想³⁾されており、津波来襲前の強震動の作用が住民等の津波避難行動に大きな影響を及ぼすことも考えられる。この点に関して、これまで著者ほか⁴⁾⁻⁷⁾は、南海トラフ巨大地震に

よる強震動予測を高密度に実施し、予測地震動が津波避難に及ぼす影響について検討を行っている。具体的には、和歌山県串本町を対象にした検討⁴⁾では高密度常時微動

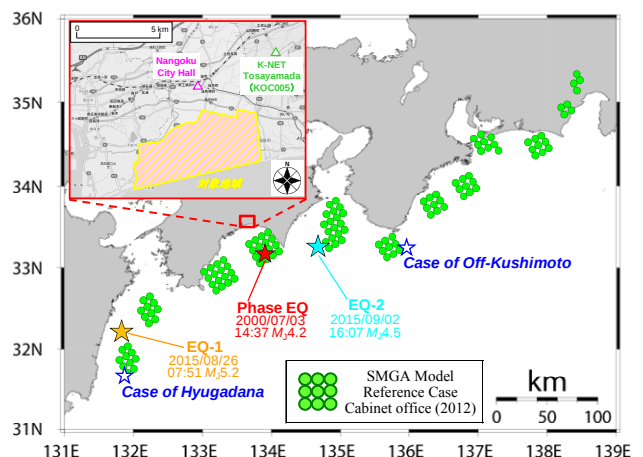


図-1 南海トラフ巨大地震の震源域と南国市沿岸域

計測(525地点)により評価したサイト増幅特性に基づいた強震動予測、和歌山県広川町を対象にした検討⁷⁾では高密度臨時地震観測(17地点)・高密度常時微動計測(427地点)により評価したサイト増幅特性に基づいた強震動予測、静岡県相良町および松崎町を対象にした検討⁶⁾では高密度地震観測(既存観測網の利活用：8地点)により評価したサイト増幅・位相特性に基づいた強震動予測、宮崎県宮崎市(11地点)を対象にした検討⁷⁾では高密度臨時地震観測により評価したサイト増幅特性に基づいた強震動予測、をそれぞれ実施済みである。しかしながら、四国地方の津波来襲予想地域を対象にした強震動予測はこれまで行われておらず、臨時設置した地震観測点の数も十分であるとは言い難いのが現状である。

一方で、中嶋・岡田⁸⁾は、南国市の津波来襲予想地域を解析対象として(以後、対象地域と呼ぶ)⁹⁾、地震動と津波の複合災害を考慮した人的被害の推定を行っている。その際、地震動による災害は、内閣府による強震動予測結果¹⁾に基づいており、対象地域における地盤震動特性が詳細に考慮されているとは言い難いのが現状である。

上述した背景を踏まえ、本稿では、地盤震動特性を考慮した対象地域での強震動予測を高密度に実施した。具体的には、まず、対象地域において臨時地震観測(計51地点)を広域かつ高密度に実施し、得られた地震観測記録に基づいてサイト増幅特性を評価した。次に、評価したサイト増幅特性と、南海トラフ巨大地震によるSMGAモデル¹⁾を用いた強震動シミュレーションを行い、対象地域に作用する強震動を臨時観測点(計51地点)ごとに予測した。最後に、予測地震動に基づく気象庁計測震度¹⁰⁾や瞬間計測震度¹¹⁾¹²⁾の時刻歴を算定することによって、強震動の作用が津波避難に及ぼす影響について基礎的な検討を行った。

2. 高密度臨時地震観測

サイト増幅特性を評価する手法(3.参照)は、常時微動計測に基づく手法¹³⁾¹⁴⁾と臨時地震観測に基づく手法¹⁵⁾¹⁶⁾に大別されるが、本稿では、経験的關係を採用することなく、直接的に高精度評価可能である後者を採用した。

図-2 および図-3 に対象地域(津波来襲予想地域⁹⁾、南国市役所周辺(津波非来襲予想地域⁹⁾)に設けた臨時地震観測点(地震アレー観測地点)の分布を示す。図-2 および図-3 に示すように、対象地域内に計 51 地点の臨時地震観測点を設けた。さらに、本研究では、既存強震観測点である K-NET 土佐山田¹⁸⁾の周辺および南国市役所の周辺にも臨時地震観測点をそれぞれ設けた。アレー観測の期間は、2015 年 8 月 17 日～8 月 30 日の約 14 日間(対

象地域内の 20 地点：図-2 参照)、2015 年 8 月 30 日～9 月 13 日の約 15 日間(対象地域内の 31 地点：図-2 参照)、2015 年 8 月 17 日～9 月 13 日の約 28 日間(K-NET 土佐山田(図-1 参照)周辺および南国市役所(図-1 および図-2 参照)周辺)である。

ここに、同時観測(アレー観測)を採用したのは、観測地点で同じ地震記録を用いて、サイト増幅特性を評価(3.で後述)することで、観測点間のサイト増幅特性の差異を直接的に評価するためである。地震観測システムは、既往研究¹⁶⁾¹⁹⁾を参考に構築した。具体的には、地震計は加速度計(一体型微動探査兼地震計機器²⁰⁾もしくはボアホール型地震計²¹⁾を採用し、データロガーは白山工業(株)製 LS-7000XT を共通採用を採用した。観測機器の詳細については、文献 20)もしくは文献 21)を参照されたい。また、観測条件として、サンプリング周波数は 100Hz、観測方向は三成分(N-S, E-W, U-D 方向)とし、トリガー加速度レベルは設定せずに常時観測を継続するシステムを採用した。

その結果、日向灘を震源とする地震(以後、EQ-1(図-1 参照)と呼ぶ：2015/08/26 07:51 30km M_s5.2)による観測記録が対象地域内 20 地点(図-2 参照)・K-NET 土佐山田周

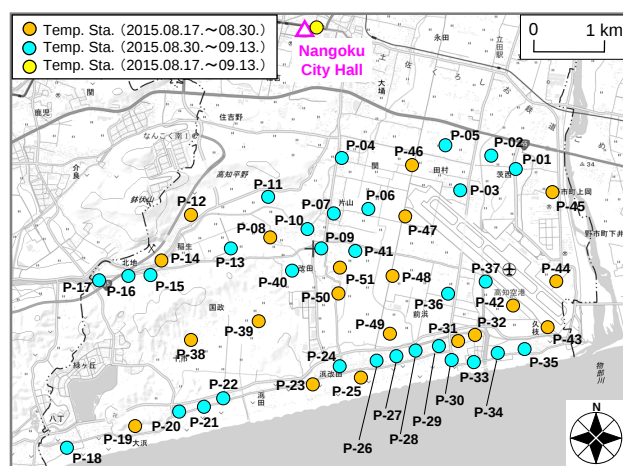


図-2 臨時地震観測点の分布(現地形図¹⁷⁾に加筆)

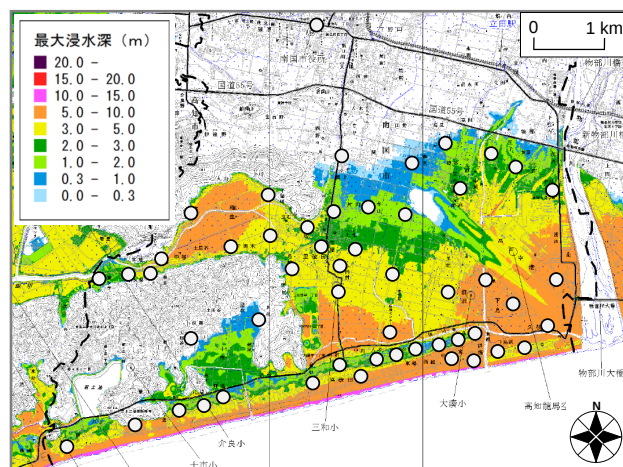


図-3 臨時地震観測点の分布(津波浸水予想図⁹⁾に加筆)

辺・南国市役所周辺(計22地点)で同時に得られた。一方で、四国沖を震源とする地震(以後、EQ-2(図-1参照)と呼ぶ：2015/09/02 16:07 34 km M 4.5)による観測記録が対象地域内31地点(図-2参照)・K-NET土佐山田周辺・南国市役所周辺(計33地点)で同時に得られた。なお、既存強震観測点(K-NET土佐山田・南国市役所)では、EQ-1およびEQ-2による観測記録が残されておらず、両既存強震観測点(トリガー加速度レベル)の周辺における地震観測点の臨時設置に関する有意性を確認することができる。

3. サイト増幅特性の評価

図-4は、対象地域内に設けた臨時地震観測点(P-01～51)におけるサイト増幅特性、および既存強震観測点(K-NET土佐山田ならびに南国市役所)におけるサイト増幅特性²²⁾の比較である。ここに、本稿でのサイト増幅特性は、いずれも地震基盤～地表相当の地盤震動特性を表している。臨時地震観測点におけるサイト増幅特性は、二つの臨時観測点(対象地域内とK-NET土佐山田周辺)で同時に得られたEQ-1もしくはEQ-2による観測記録に基づいて評価^{22,23)}した。具体的には、同時地震観測記録を対象に、伝播経路特性^{24,25)}の違いを考慮したフーリエスペクトルの比率(対象地域内(P-01～51)/K-NET土佐山田周辺：図-5参照)を計算し、この比率をK-NET土佐山田における既存のサイト増幅特性²⁶⁾に掛け合わせることで、サイト増幅特性を算定^{22,23)}した。

図-4に示すように、サイト増幅特性の特徴の一つとしてピーク周波数が概ね3～4Hz付近および6～7Hz付近にそれぞれあるものの、スペクトル形状などの他の特徴は臨時地震観測点ごとに異なっており、対象地域における地盤震動特性は一様であるとは言い難い。これは、南海トラフ巨大地震時において対象地域に作用する強震動の特性にも大きな違いが生じる可能性が高いことを示唆するものである。

ここに、K-NET土佐山田(既存強震観測点)ではなくK-NET土佐山田周辺(臨時地震観測点)で得られた記録に基づいてサイト増幅特性を評価しているため、その適用性について若干の考察を行う。図-6は、観測地震動により算定されたフーリエスペクトルの比率(南国市役所/K-NET土佐山田)を、[A]2011～2015年の地震(ただし、EQ-1およびEQ-2を含まない)による記録に基づく既存強震観測点同士のケース(Case_A)、[B]EQ-1による記録に基づく臨時地震観測点同士のケース(Case_B)、[C]EQ-2による記録に基づく臨時地震観測点同士のケース(Case_C)についてそれぞれ比較したものである。図-6に示すように、Case_Aのスペクトル比(平均)に対して、

Case_BおよびCase_Cのスペクトル比は、表示周波数帯域(0.2～10Hz)において概ね類似していることから、対

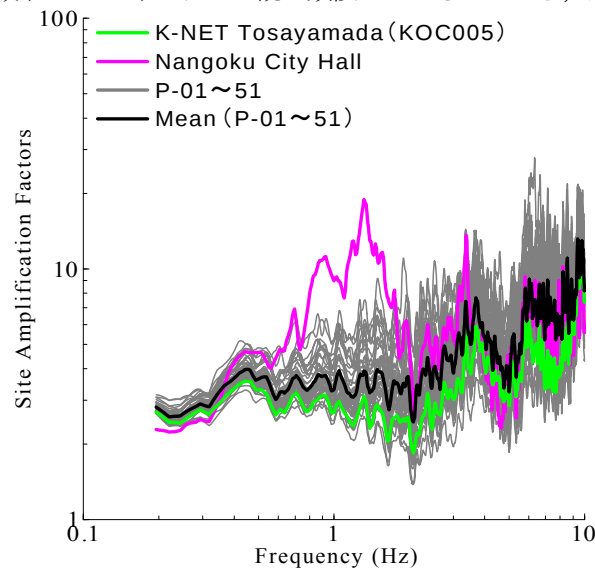


図-4 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較

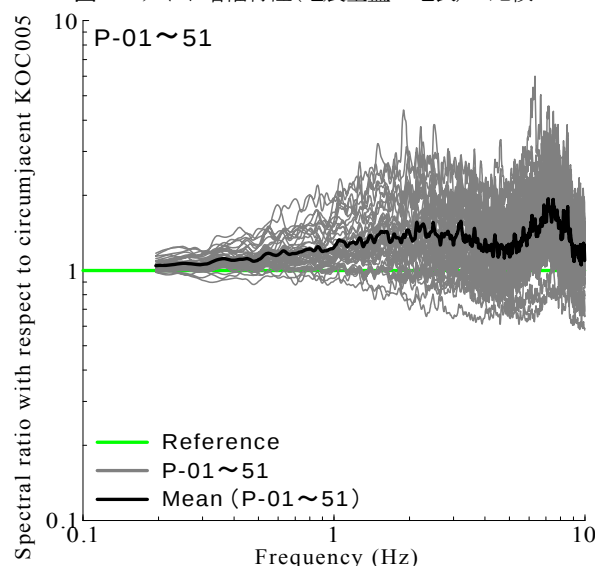


図-5 スペクトル比の比較(対象地域内)

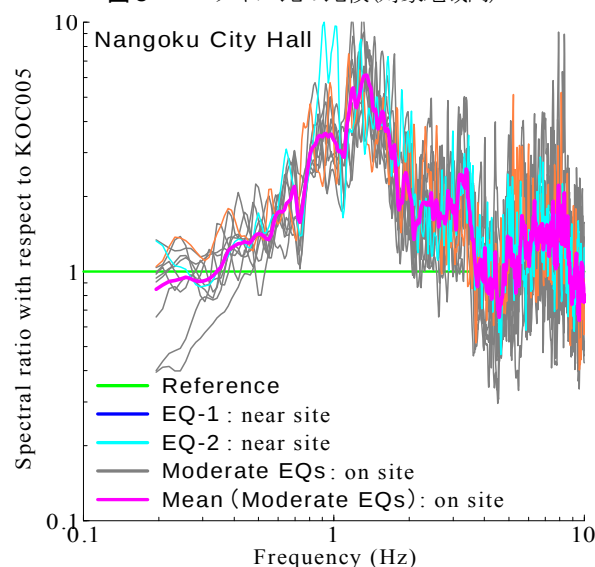


図-6 スペクトル比の比較(南国市役所)

対象地域における臨時地震観測点同士のスペクトル比(図-5参照)に対する一定の信頼性が示唆される。

図-7は、サイト増幅特性の指標の一つであるSAF(Site Amplification Factor)値²⁷⁾を、対象地域内の計15地点(P-01～51)についてプロットしたものである。SAF値は、サイト増幅特性の二深度間(基準地盤Bと地震動推定深度G)における比率の常用対数を取り、所定の周波数範囲内において積分した値であり、既往のDGS値²⁸⁾を参考に次式で表される。

$$SAF = \sum \log \left(\frac{G(f)}{B(f)} \right) \cdot \Delta f \quad (1)$$

ここに、 $B(f)$ は任意の周波数帯における地震基盤でのサイト増幅特性の値(=1(固定値))、および $G(f)$ は任意の周波数帯における地盤地表面でのサイト増幅特性の値である。本検討では、積分区間となる周波数範囲として、瞬間計測震度^{11),12)}の時刻歴に基づく強震動作用中の避難困難時間に比較的大きな影響を及ぼす周波数帯域^{29),30)}の区間(0.3～2Hz)を採用した。

図-7に示すように、対象地域内におけるSAF値の分布が一様とはなっておらず、対象地域西側よりも東側のほうがSAF値が比較的大きくなっており、特に、高知空港

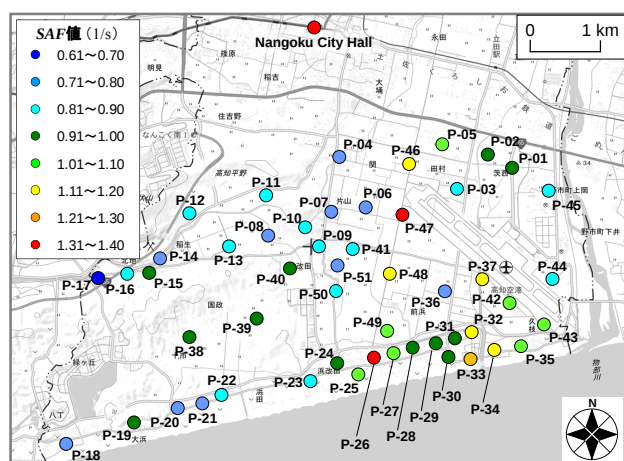


図-7 対象地域内におけるSAF値の比較



図-8 臨時地震観測点の分布(旧地形図に加筆)

南側ではSAF値が更に大きな値を示している。

図-8、図-9、図-10、図-11は、①国土地理院旧地形図、②産総研地質図³¹⁾、③国交省表層地質図³²⁾、④国交省地形分類図³²⁾による区分に対して、対象地域に設けた11つの臨時地震観測点の位置情報を重ね合わせたものである。

図-7と図-8～図-11を比較すると、各種分類図(図-8～図-11参照)の中で、評価したサイト増幅特性(図-7参照)に対して明らかな関係性を示すものを読み取ることはでき

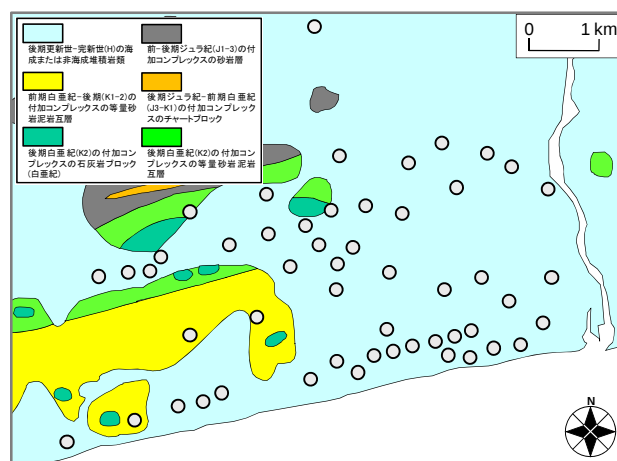


図-9 臨時地震観測点の分布(産総研地質図³¹⁾に加筆)

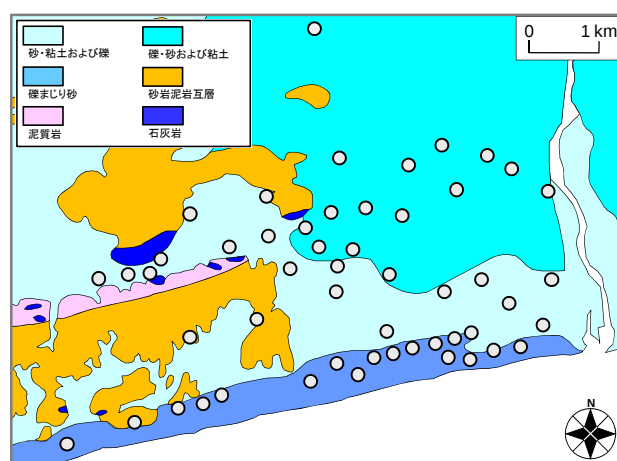


図-10 臨時地震観測点の分布(表層地質図³²⁾に加筆)

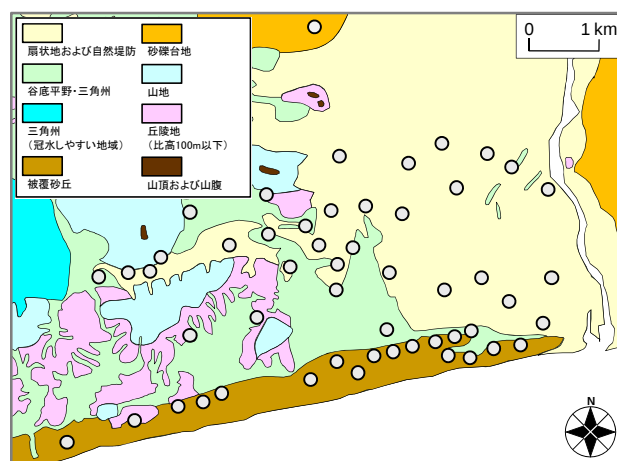


図-11 臨時地震観測点の分布(地形分類図³²⁾に加筆)

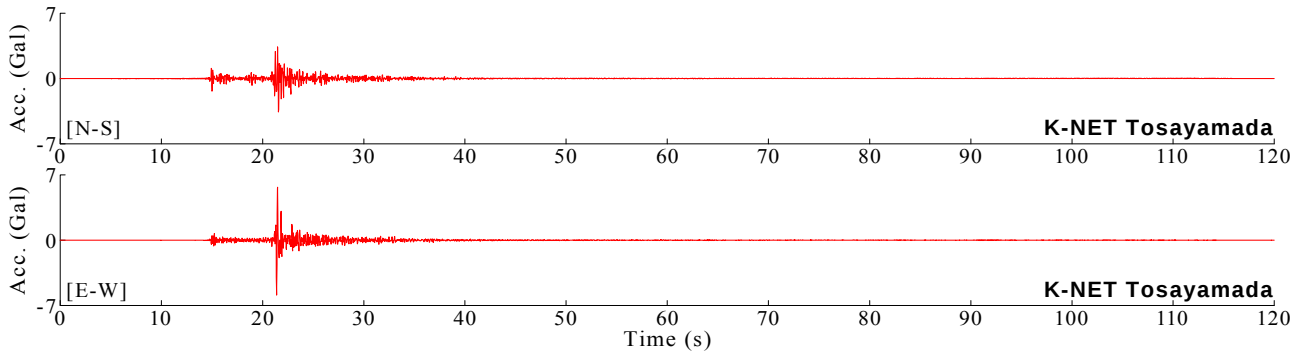


図-12 2000年土佐湾を震源とする地震(Phase-EQ：図-1参照)により臨時観測点で得られた波形記録

ない。すなわち、既存資料に基づいた机上検討だけでは、対象地域での地盤震動特性に関するゾーニングなどが非常に困難であることを裏付ける結果が得られた。

4. 震源モデルと強震波形計算手法

南海トラフ巨大地震による地震動の推定には、内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会¹⁾によるSMGAモデル(基本ケース)を採用した。図-1に静岡県駿河湾～宮崎県日向灘のサブイベント(12個のSMGAで構成)と津波来襲地域の位置関係を示す。モデルパラメータの詳細については、文献1)を参照されたい。なお、Q値については、佐藤・巽による推定値²⁵⁾を採用した。本稿では、この震源モデルにおいて破壊開始点の位置を図-1に示すとおり、串本沖(以後、串本沖ケースと呼ぶ)、もしくは日向灘(以後、日向灘ケースと呼ぶ)に配置した。

本研究では、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法³³⁾³⁴⁾を適用した。この方法では、まず式(1)により統計的グリーン関数を生成する。

$$A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \cdot \frac{O(f)}{|O(f)|_p} \quad (2)$$

ここに、 $A(f)$ は地表における統計的グリーン関数のフーリエ変換で複素数、 $S(f)$ は小地震の震源スペクトルで実数、 $P(f)$ は伝播経路特性²⁴⁾で実数、 $G(f)$ はサイト増幅特性(図-5参照)で実数、 $O(f)$ は津波来襲地域での中小地震観測記録のフーリエ変換で複素数、 $|O(f)|_p$ はその絶対値に対してバンド幅0.05HzのParzen Windowを適用したものである。震源特性を計算する際、ラディエーション係数²⁴⁾としては、全方位への平均値である0.63を用いた。また、地震動エネルギーの水平2成分への分散を表す係数であるPRITIN²⁴⁾は水平二成分ともに0.71とした。

式(1)からわかるように、本手法では、統計的グリーン関数のフーリエ振幅は震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積として求め、統計的グリーン関数のフーリエ位相としては、現地で得られた地震記録のフーリエ位相

を用いる。式(1)をフーリエ逆変換し、経験的グリーン関数法と同様の重ね合わせ³⁵⁾を行うことで、大地震による波形が求まる。なお、Parzen Window(式(2)において添字 p で表示)は、因果性を満足する地震波を生成する目的で用いられている³⁴⁾。

サイト位相特性(式(2)における中小地震観測記録のフーリエ変換 $O(f)$)の取り扱いについては、入射角およびback azimuthが各サブイベントとできるだけ共通となるように(堆積層が地震動の位相に及ぼす影響をより適切に考慮できるように)選定した。具体的には、2000年7月3日14時37分に発生した土佐湾を震源とする地震($M_j 4.2$ ：以後、Phase-EQ(図-1参照)と呼ぶ)によってK-NET土佐山田で得られた観測波形(図-12参照)を串本沖ケースおよび日向灘ケースにおいてそれぞれ共通採用した。

なお、上記のプロセスで得られた地表面相当の推定地震波は、本震時における地盤の非線形挙動の影響が考慮されていない。そのため、当該推定波に対して対象地域でのボーリング調査結果や土質試験結果に基づいた線形／非線形の重複反射理論³⁶⁾³⁷⁾を適用³⁸⁾することによって、表層地盤による非線形挙動の影響を考慮した。具体的には、上記の強震波形計算手法³³⁾³⁴⁾によって得られた地表面相当の推定地震波に対して表層地盤(工学的基盤～地表)の一次元線形地震応答解析を適用し、工学的基盤相当波を計算した。そして、工学的基盤相当波に対して表層地盤の一次元非線形地震応答解析を適用し、地表面相当波(表層地盤の非線形挙動の影響を考慮)を算定した。

5. 強震動予測結果

図-13(a),(b)および図-14(a),(b)には、強震動予測結果の一例として、串本沖ケースおよび日向灘ケースにおけるP-01での予測地震動(水平動)の加速度波形を示す。ここでは、震源モデルとしてSMGAモデル³⁹⁾を採用しているため、一定の信頼性があると考えられる地震動指標値として、気象庁計測震度¹⁰⁾および避難困難時間^{29),30)}をそ

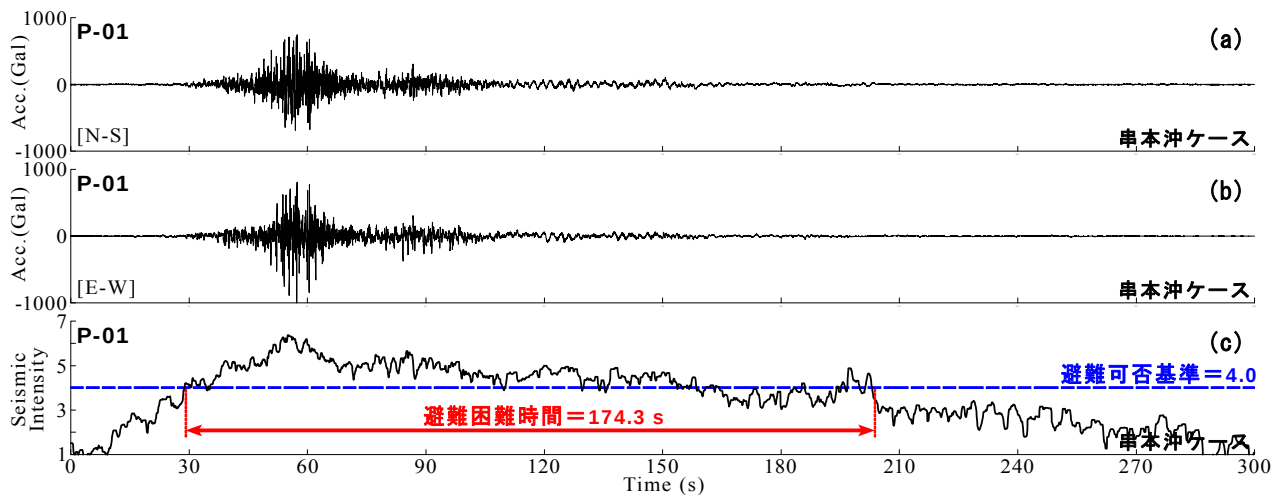


図-13 予測強震動による瞬間計測震度の時刻歴に基づく避難困難時間の算定例(串本沖ケース)

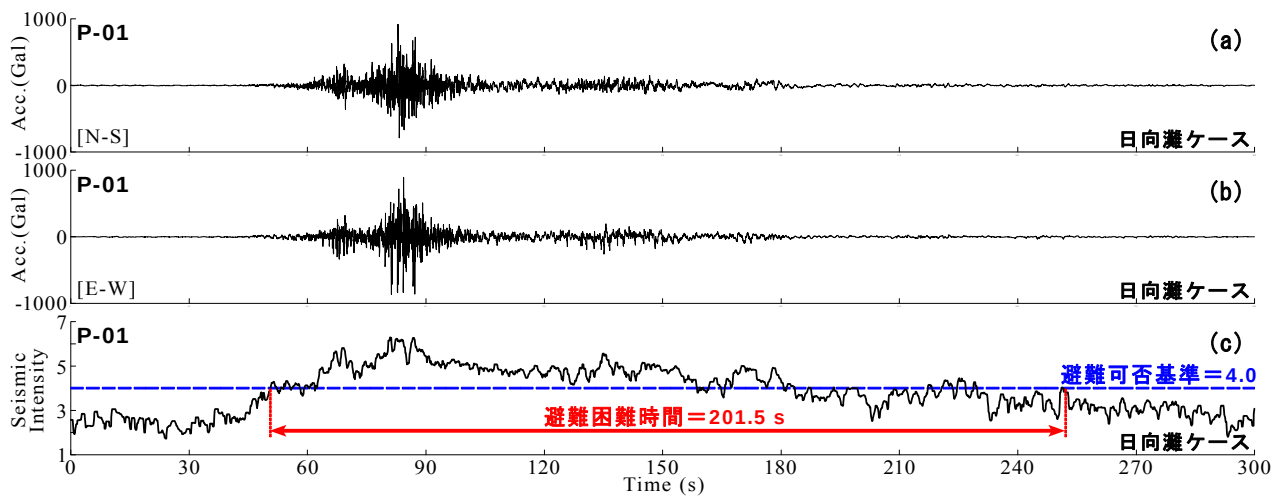


図-14 予測強震動による瞬間計測震度の時刻歴に基づく避難困難時間の算定例(日向灘ケース)

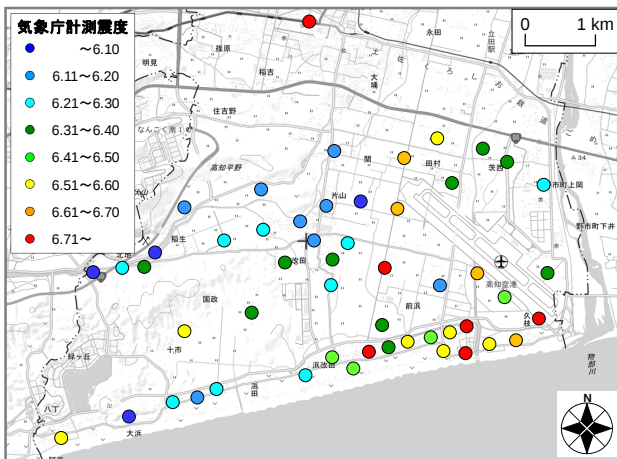


図-15 気象庁計測震度の分布(串本沖ケース)

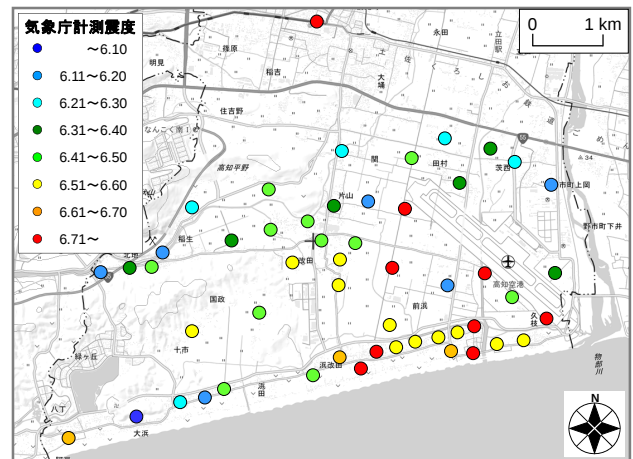


図-16 気象庁計測震度の分布(日向灘ケース)

それぞれ算定した。具体的には、水平二成分合成による瞬間計測震度¹¹⁾の時刻歴を計算し(図-13(c)および図-14(c)の一例参照)、時刻歴内での最大値を気象庁計測震度、瞬間計測震度が最初に4.0を上回り・最後に4.0を下回るまでの連続時間(先行研究¹²⁾による知見を参考に設定)を

避難困難時間とそれぞれ定義した。

図-15および図-16は、串本沖ケースおよび日向灘ケースにおける対象地域での気象庁計測震度の分布である。図-15および図-16に示すように、予測地震動による気象庁計測震度の値は対象地域において一様であるとはい

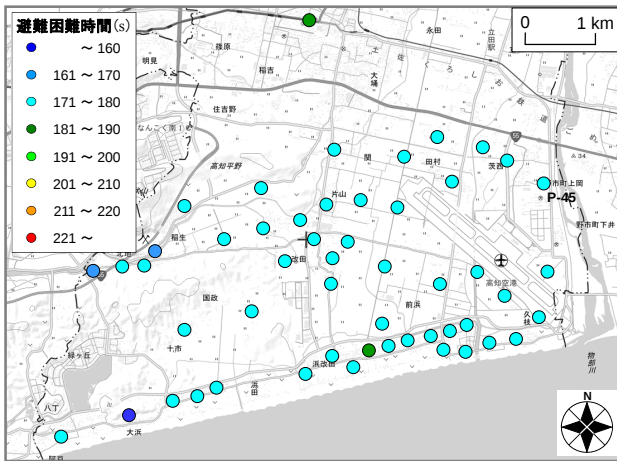


図-17 避難困難時間の分布(串本沖ケース)

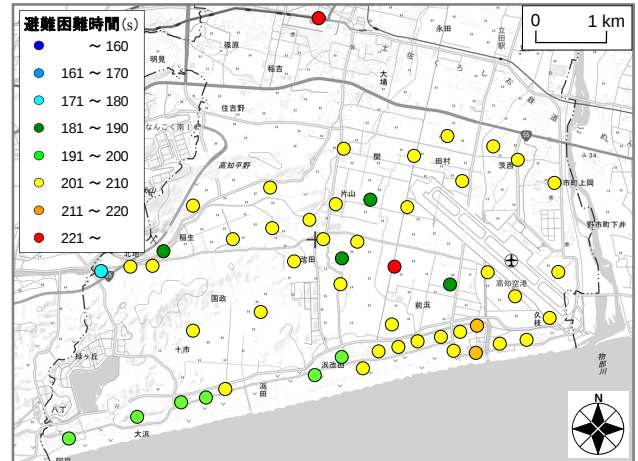


図-18 避難困難時間の分布(日向灘ケース)

難く、串本沖ケース(図-15参照)および日向灘ケース(図-16参照)ともに高知空港南側において比較的大きな気象庁計測震度の値となっている。また、図-15と図-16を比較すると、対象地域では、串本沖ケース(図-15参照)よりも日向灘ケース(図-16参照)のほうが若干ではあるが気象庁計測震度が大きく算定される傾向にある。

図-17および図-18は、串本沖ケースおよび日向灘ケースにおける対象地域での避難困難時間の分布である。図-17および図-18に示すとおり、上述した気象庁計測震度の分布(図-15および図-16参照)に比べて避難困難時間の分布は概ね様であり、串本沖ケース(図-17参照)において180s程度および日向灘ケース(図-18参照)において210s程度となっている。これは、本稿での対象地域においては、各臨時地震観測点でのサイト増幅特性の差異よりも、南海トラフ巨大地震の発生シナリオ(破壊開始点)の差異のほうが、津波避難パフォーマンス(強震動作用中の避難困難時間)に大きな影響を及ぼしていることを示唆するものである。

6. まとめ

本稿では、南海トラフ巨大地震時に津波の来襲が予想される高知県南国市の沿岸域において臨時地震観測を広域かつ高密度に行い、得られた結果に基づいて当該地域でのサイト増幅特性を評価した。そして、評価したサイト増幅特性を用いて南海トラフ巨大地震を対象とした強震動シミュレーションを行うことで、当該地域に作用する強震動を予測した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 中嶋・岡田(2015)によって地震動と津波の複合災害を考慮した人的被害の推定が行われている南国市の沿岸域では、臨時地震観測(計51地点)により得られた記録に基づいて評価したサイト増幅特性(特にス

ペクトル形状)に有意な差異が確認できることから、津波来襲予想地域における地盤震動特性が一樣であるとは言い難い。

- (2) 津波来襲予想地域におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)は、地形や地質による分類に対して、明らかな関係性を見出すことはできない。
- (3) 津波来襲予想地域では、サイト増幅特性の差異に主に起因して、南海トラフ巨大地震時に作用する地震動の特性(気象庁計測震度等)が異なってくることが予測され、特に、高知空港南側では比較的大きな気象庁計測震度の値を示す予測結果が得られた。
- (4) 津波来襲予想地域における津波避難パフォーマンス(瞬間計測震度の時刻歴に基づく強震動作用中の避難困難時間)は、180s程度(串本沖を破壊開始点とした地震発生シナリオ)および210s程度(日向灘を破壊開始点とした地震発生シナリオ)とそれぞれ予測され、気象庁計測震度(上記(3))に比べて避難困難時間は、津波来襲予想地域内で概ね様な分布を示す。

今後は、先行研究による成果⁸⁾に本稿で得られた知見を考慮することによって、南国市沿岸域を対象フィールドとした地震動と津波の複合災害を考慮した人的被害の推定精度を高めていきたいと考えている。

謝辞：高知県震度情報ネットワークシステムによって得られた南国市役所での地震観測波形データを高知県および南国市よりご提供していただきました。(国研)防災科学技術研究所が管理するK-NET土佐山田によって得られた地震観測波形データを利用しました。現地踏査および臨時地震観測などの実施にあたっては、南国市の住民の皆様など大変お世話になりました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの

- 巨大地震モデル検討会(第二次報告), 強震断層モデル編—強震断層モデルと震度分布について—, 内閣府防災情報ホームページ, 2012. (last accessed: 2016/09/01)
- 2) 野津厚, 一井康二: 性能設計の発展型としての Evidence-Based Design の提案とその実現に向けた課題, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, 日本地震工学会, pp.3073-3080, 2010.
 - 3) 南海トラフの巨大地震モデル検討会: 南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告), 津波断層モデル編—津波断層モデルと津波高・浸水域等について—, 内閣府防災情報ホームページ, 2012. (last access ed: 2016/09/01)
 - 4) 湊文博, 秦吉弥, 山田雅行, 常田賢一, 鉦田泰子, 魚谷真基: 高密度常時微動計測に基づく和歌山県串本町における南海トラフ巨大地震の強震動評価と津波避難に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1, Vol.71, No.4, pp.I_123-135, 2015.
 - 5) 湊文博, 秦吉弥, 常田賢一, 鉦田泰子, 小山真紀, 植田裕也: 高密度常時微動計測・臨時地震観測に基づく南海トラフ巨大地震における和歌山県広川町での津波避難不可能時間算出のための強震動評価, 土木学会論文集 A1, Vol.72, No.4, pp.I_68-81, 2016.
 - 6) 秦吉弥, 湊文博, 山田雅行, 鉦田泰子, 小山真紀, 中嶋唯貴, 常田賢一: 強震動作用中の津波避難困難時間に関する評価精度とその向上策—南海トラフ巨大地震における駿河湾沿岸域を対象として—, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.62A, pp.259-272, 2016.
 - 7) 秦吉弥, 湊文博, 村上啓介, 山田雅行, 鉦田泰子, 小山真紀, 中嶋唯貴, 常田賢一: 高密度臨時地震観測に基づく南海トラフ巨大地震における宮崎市沿岸部での津波避難困難時間算出のための強震動予測, 第 36 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, 2016. [in this issue]
 - 8) 中嶋唯貴, 岡田成幸: 震動及び津波の複合災害を想定した人的被害推定手法の提案, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.88, pp.101-104, 2015.
 - 9) 南国市: 津波浸水予想図(南海トラフの巨大地震による震度分布・津波浸水予測について(第 2 弾)), 危機管理課ホームページ, 2013. (last accessed: 2016/09/01)
 - 10) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
 - 11) Kuwata, Y. and Takada, S.: Instantaneous instrumental seismic intensity and evacuation, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.24, No.1, pp.35-42, 2002.
 - 12) 鉦田泰子, 齊藤栄: 瞬間計測震度を用いた揺れ最中の避難行動可能時間の定量化, 日本地震工学会論文集, Vol.10, No.5, pp.52-65, 2010.
 - 13) 秦吉弥, 湊文博, 山田雅行, 常田賢一, 魚谷真基: 和歌山県串本町における高密度常時微動計測, 物理探査, Vol.68, No.2, pp.83-90, 2015.
 - 14) 山田雅行, 原忠, 北村暢章, 竹澤請一郎, 羽田浩二, 八木悟: 揺れやすさマップ精度向上のための常時微動利用法に関する研究, 地域安全学会論文集, No.22, pp.1-10, 2014.
 - 15) 秦吉弥, 常田賢一, 湊文博: 高密度中小地震観測に基づく和歌山県広川町でのサイト増幅特性の評価, 第 50 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.2017-2018, 2015.
 - 16) 秦吉弥, 吉田武, 常田賢一: 超高密度地震アレー観測に基づく造成宅地におけるサイト増幅特性の評価, 日本地震工学会第 11 回年次大会梗概集, No.P1-7, 2015.
 - 17) 国土交通省国土地理院: 地理院地図(電子国土 Web), 2015. (last accessed: 2016/09/01)
 - 18) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
 - 19) 秦吉弥, 吉田武, 福島康宏, 常田賢一, 池田隆明: 超高密度地震アレー観測に基づく首都直下地震を対象とした造成宅地における強震動予測, 第 6 回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集, 土木学会, pp.7-21, 2016.
 - 20) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 飯澤清典, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 第 115 回物理探査学会学術講演会講演論文集, pp.227-229, 2006.
 - 21) 秦吉弥, 一井康二, 常田賢一, 柴尾享, 山田雅行, 満下淳二, 小泉圭吾: アレー計測を利用した道路盛土の地震応答特性の評価, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2010 論文集, 地盤工学会, pp.21-26, 2010.
 - 22) (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 国土交通省港湾局監修, pp.336-341, 2007.
 - 23) 秦吉弥, 中嶋唯貴, 湊文博, 鉦田泰子, 小山真紀, 常田賢一: 短期間の臨時地震観測によりサイト増幅特性を広域評価する試み—南海トラフ巨大地震における高知県南国市の津波来襲予想地域を例として—, 第 51 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1899-1900, 2016.
 - 24) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, No.6A, pp.1865-1894, 1983.
 - 25) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.15-24, 2002.
 - 26) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.2, pp.215-234, 2007.
 - 27) Hata, Y., Ueda, Y., Minato, F., Ikeda, T., Fukushima, Y., Tokida, K. and Yoshida, T.: Evaluation of 'SAF value' at reclaimed land in residential area based on seismic array observation with very high dense spatial location, *Proc. of the 5th International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Taipei, Taiwan, Paper No. P125A, 2016.
 - 28) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: Variation of earthquake ground motions within very small distance, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.66, pp.429-442, 2014.
 - 29) 湊文博, 秦吉弥, 藤木昂, 山田雅行, 鉦田泰子, 小山真紀, 中嶋唯貴, 常田賢一: 津波避難困難時間に影響を及ぼす地震動の周波数帯域に関する評価—石

- 巻市街地を例として一，平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集，No.0321, 2016.
- 30) 湊文博，秦吉弥，藤木昂，山田雅行，鉦田泰子，小山真紀，中嶋唯貴，常田賢一：津波避難困難時間に影響を及ぼす地震動の周波数帯域に関する評価—仙台市沿岸域を例として一，第 51 回地盤工学研究発表会講演概要集，pp.1901-1902, 2016.
 - 31) 産業技術総合研究所：地質図表示システム(地質図Navi)，地質調査総合センターホームページ，2013. (last accessed: 2016/09/01)
 - 32) 国土交通省国土政策局：5 万分の 1 都道府県土地分類基本調査(高知)，国土政策局国土情報課ホームページ，2003. (last accessed: 2016/09/01)
 - 33) 古和田明，田居優，岩崎好規，入倉孝次郎：経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価，日本建築学会構造系論文集，No.512, pp.97-104, 1998.
 - 34) 野津厚，長尾毅，山田雅行：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—，土木学会論文集 A，Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
 - 35) 入倉孝次郎，香川敬生，関口春子：経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良，日本地震学会秋季大会講演予稿集，No.2, B25, 1997.
 - 36) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K.: Equivalent linear method considering frequency dependant characteristics of stiffness and damping, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.22, No.3, pp.205-222, 2002.
 - 37) 吉田望，末富岩雄：DYNEQ: 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム，佐藤工業(株)技術研究所報，pp.61-70, 1996.
 - 38) 例えば，秦吉弥，一井康二，村田晶，宮島昌克，野津厚，柴尾享，常田賢一：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法に基づく 2007 年能登半島地震での能登有料道路全域にわたる地震動の推定，第 3 回近年の国内外で発生した大地震の記録と課題に関するシンポジウム発表講演集，土木学会，Vol.3, No.3, pp.17-24, 2010.
 - 39) Miyake, H., Iwata, T. and Irikura, K.: Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.93, No.6, pp.2531-2545, 2003.

(2016. 9. 1 受付)

EVALUATION OF STRONG MOTION AND DIFFICULT TIME FOR TSUNAMI EVACUATION WITH HIGH DENSE SPATIAL LOCATION IN COASTAL AREAS, NANGOKU CITY, JAPAN, DURING A SCENARIO EARTHQUAKE WITH $M_w9.0$ ALONG THE NANKAI TROUGH BASED ON THE SMGA MODELS CONSIDERING GROUND SHAKING CHARACTERISTICS

Yoshiya HATA, Tadayoshi NAKASHIMA, Fumihiro MINATO,
Yasuko KUWATA, Maki KOYAMA and Ken-ichi TOKIDA

During a scenario earthquake with $M_w9.0$ along the Nankai Trough, not only strong motion but also huge tsunami is predicted in coastal area, Nangoku City, Japan. In this study, first, based on temporary earthquake observation records with high dense spatial location, site amplification factors from seismic bedrock to ground surface at 51 sites in the areas of interest were evaluated. Seismic waveforms in the area were then predicted with high density and wide area based on the SMGA models considering the empirical site amplification factors. Using the detailed distribution of JMA seismic intensity and difficult time for tsunami evacuation due to the predicted seismic waveforms, finally, we discussed the influence which the action of the strong motion has on evacuation.